

## کاربرد مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی در شناسایی هندسه زمین لغزش نقل، سمیرم

احمد قربانی<sup>۱\*</sup>، مهدی بمانی<sup>۲</sup>، عبدالحمید انصاری<sup>۳</sup> و حسینعلی قاری<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۹۳/۰۲/۰۳

دریافت مقاله: ۹۲/۰۹/۰۳

### چکیده

زمین لغزش نقل واقع شده در منطقه پادناهی سمیرم در نزدیکی روستای نقل در ۷۰ کیلومتری جنوب شهر حنا، رخ داده است. این زمین لغزش مثلث شکل است. قاعده آن با طول حدود ۷۰۰ متر در سمت غرب و به سمت رودخانه دنگزلو (از سرشاخه‌های رودخانه ماربر)، و فاصله راس آن تا قاعده تقریباً ۶۰۰ متر است. جهت حرکت کلی توده لغزشی نیز از شرق به غرب، و به طرف رودخانه می‌باشد. زمین لغزش در سازند بختیاری متشکل از کنگلومرا با میان لایه‌های مارنی رخ داده است. وضعیت زمین شناسی زیرسطحی محدوده زمین لغزش توسط برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی با آرایه دوقطبی-دوقطبی مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور سه خط برداشت در جهت حرکت زمین لغزش و سه خط برداشت در جهت عمود بر جهت حرکت زمین لغزش با فواصل مساوی، در مجموع به طول ۳ کیلومتر طراحی و بر روی آنها اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی صورت گرفت. نتایج مطالعه مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی، وجود لایه مارنی با ضخامت بیش از ۵۰ متر در تمام محدوده زمین لغزش را نشان می‌دهد. ضلع شمال شرقی زمین لغزش توسط گسل محدود شده است، به طوری که شمال شرق آن کنگلومرا و جنوب غرب آن رخنمون مارن قرار دارد. وجود مارن در نزدیکی سطح زمین و در عمق باعث ایجاد دو مکانیزم لغزش یکی نزدیک سطح و دیگری در عمق پیشتر شده است. سطح لغزش نزدیک سطح در عمق کمتر از ۲۰ متر شناسایی شده است در حالی که سطح لغزش عمیق در عمق حدود ۵۰ متر قابل تشخیص است. نتایج حاصل از مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی با نتایج چاهک‌های حفر شده مطابقت دارد.

**کلید واژه‌ها:** مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی، زمین لغزش، سطح لغزش، مارن، کنگلومرای بختیاری، سمیرم

۱. استادیار ژئوفیزیک اکتشافی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [aghorbani@yazd.ac.ir](mailto:aghorbani@yazd.ac.ir)

۲. دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [bemanimahdi@gmail.com](mailto:bemanimahdi@gmail.com)

۳. دانشیار ژئوفیزیک اکتشافی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [h.ansari@yazd.ac.ir](mailto:h.ansari@yazd.ac.ir)

۴. دانشجوی دوره دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشگاه یزد، [hosseinali.ghari@gmail.com](mailto:hosseinali.ghari@gmail.com)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

حرکت و جابجایی بخشی از مواد دامنه در امتداد یک سطح گسیختگی مشخص لغزش نامیده می‌شود، به بیان دیگر زمین لغزش، حرکت سریع سنگ یا خاک به صورت توده‌ای پیوسته است. لغزش انواع مختلف داشته و در هر نوع مصالحی می‌تواند ایجاد شود. ویژگی‌های توده متحرک و شکل سطح گسیختگی معمولاً به عنوان عوامل طبقه‌بندی لغزش‌ها به کار گرفته می‌شوند، به عنوان مثال در لغزش‌های دامنه‌ای تغییر شکل از نوع «برش ساده» می‌باشد. شکاف بالای زمین لغزش به راحتی قابل مشاهده است. زاویه شیب، میزان آب و نوع مواد زمین از ویژگی‌های زمین لغزش سطوح است، طوری که می‌توان گفت شیب‌های پر شیب شیلی مستعد زمین لغزش هستند و فشار آب منفذی، عامل کلیدی در ایجاد زمین لغزش است، که فشار آب منفذی را می‌توان فشار آبی که حفرات میان ذرات را پر می‌کند تعریف کرد. در هنگام رخ دادن زمین لغزش مقاومت برشی که یک نیروی مقاوم است کاهش می‌یابد و نیروی وزن که یک نیروی محرک است افزایش می‌یابد. برای پایدارسازی دامنه تحت تأثیر زمین لغزش و متوقف ساختن حرکت آن لازم است وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی از جمله نوع توده‌ها یا لایه‌های زمین، وضعیت سطوح لغزش و عمق آنها، وجود گسل‌های احتمالی و وضعیت آب زیرزمینی در محدوده زمین لغزش مورد شناسایی قرار گیرد تا متناسب با این نوع اطلاعات تمهیدات لازم برای پایدارسازی اندیشیده شود. معمولاً برای مطالعات زیرسطحی از تلفیقی از روش‌های حفر چاهک، حفر گمانه و روش‌های مختلف ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های ژئوفیزیکی قابل کاربرد در مطالعه وضعیت زیرسطحی زمین لغزش روش مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی است. این روش به طور وسیع در بررسی زیرسطحی زمین لغزش‌ها کاربرد دارد (Jongmans and Garambois, 2007). در این روش، تصویرهای دو یا سه بعدی از تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ساختار زمین لغزش تولید می‌شود. با توجه به وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی به اشباع، درز و شکاف، محتوی رس و هوازدگی سنگ‌ها، اغلب برای تخمین سطوح شکست (لغزش) به کار می‌رود. در بسیاری از حالات، نتایج

به دست آمده از این روش به شناخت ساخت هندسه توده لغزیده، الگوی سطح لغزش و تعیین مناطق با محتوی آب بالا کمک مؤثری می‌نماید (Demoulin et al., 2003; Bichler et al., 2004; Perrone et al., 2004; Lapenna et al., 2005; Meric et al., 2006). سونداژ قائم الکتریکی تغییرات مقاومت ویژه را در جهت قائم در یک نقطه به دست می‌دهد، در حالی که در روش مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی تصویر الکتریکی با قدرت تفکیک بالا در دو یا سه جهت از ساختار زیرسطحی به دست می‌آید (Loke and Barker, 1996). معمولاً مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی در مقایسه با نوع سه بعدی آن به دلیل سرعت برداشت زیاد و عملیات صحرائی راحت‌تر کاربرد وسیع‌تری یافته است (Perrone et al., 2004; Lapenna et al., 2005).

مطالعات ژئوالکتریک زمین لغزش در ایران تاکنون بیشتر به روش برداشت سونداژ الکتریکی یک بعدی با آرایه شولمبرژه و CRP انجام شده است (حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عنایتی مقدم، ۱۳۸۶؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۸۵). در این برداشت‌ها فرض بر این است که تغییرات زیرسطحی یک بعدی است. با توجه به این که تغییرات زیرسطحی در زمین لغزش‌ها در هر دو جهت افقی و قائم اتفاق می‌افتد، استفاده از سونداژ الکتریکی یک بعدی ساده‌سازی بیش از حد می‌باشد. لذا در مطالعه وضعیت زیرسطحی زمین لغزش‌ها استفاده از روشی مانند مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی که در آن تصویر الکتریکی قدرت تفکیک بالا در دو یا سه جهت از ساختار زیرسطحی به دست می‌آید ضرورت دارد. در روش مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی نسبت به روش‌های متداول مقاومت ویژه به تجهیزات بیشتری نظیر کابل هوشمند برداشت مقاومت ویژه نیاز می‌باشد. تفسیر دو بعدی برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی معمولاً نتایج واقعی‌تری نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد (قربانی و تدین، ۱۳۸۹).

در این نوشتار، ابتدا به طور مختصر به معرفی مبانی روش مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از مطالعات مقاومت ویژه با اجرای روش دوبعدی آن در شناخت وضعیت زیرسطحی زمین لغزش نقل واقع در بخش پادانای سمیرم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. روش مقاومت ویژه الکتریکی 2D

تکنیک مورد استفاده در این مطالعه به منظور شناخت چند بعدی مقاومت ویژه الکتریکی به کار می‌رود. به عبارت دیگر با این روش تصویر الکتریکی زیرسطحی تهیه می‌گردد. در این روش توزیع فضایی قائم و افقی مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد یک خط روی زمین برداشت می‌شود. در روش مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی فرض بر این است که تغییرات مقاومت ویژه در جهت عمود بر امتداد خط برداشت وجود ندارد. به همین دلیل پروفیل‌های الکتریکی به طور معمول عمود بر امتداد آنومالی‌ها برداشت می‌شود.

در این روش معمولاً تعدادی الکتروود فلزی با فواصل مساوی بر روی یک خط قرار می‌گیرند. در هر قرائت، چهار الکتروود برای تزریق جریان الکتریکی (دو الکتروود) و اندازه‌گیری پتانسیل (دو الکتروود) انتخاب می‌شوند. همه حالات مختلف از چهار الکتروود انتخابی، یک سکانس اندازه‌گیری را تشکیل می‌دهد (شکل ۱). افزایش فاصله بین الکتروودها بررسی‌های عمیق‌تر را ممکن می‌سازد. عمق بررسی با توزیع مقاومت ویژه زیرسطحی و به آرایه الکتروودی ارتباط دارد. آرایه‌های الکتروودی بر اساس هدف کاوش و حساسیت لازم افقی و یا قائم انتخاب می‌شوند (Loke, 2001). آرایه‌های ونر، شولمبرگر و دوقطبی-دوقطبی بیشترین کاربرد را دارند. در دستگاه‌های خودکار مقاومت ویژه الکتریکی مانند Syscal Pro و یا SAS4000 (ABEM)، توالی توسط نرم‌افزار برنامه‌ریزی می‌شود. برای مثال نرم‌افزارهای ElectreII و یا X2ipi این نرم‌افزارها موقعیت هر چهار الکتروود را بر اساس آرایه مورد استفاده و افزایش فاصله الکتروودی تعیین می‌کند. سیستم‌های خودکار شامل میکروپروسسور و سویچ (مولتی پلکسر) می‌باشند (Werkema et al., 2000).

دستگاه‌های نیمه اتوماتیک (مورد استفاده در این پژوهش) موقعیت الکتروودها بر اساس شماره‌گذاری آنها و آرایه الکتروودی قبل از برداشت برنامه‌ریزی می‌گردد. از هر الکتروود یک سیم به دستگاه اندازه‌گیری وصل می‌شود و مجموعه آنها در پوشش یک کابل قرار می‌گیرند.

در تفسیر کیفی داده‌ها، شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری تهیه می‌گردند. شبه مقطع از کنار هم قرار دادن مقاومت ویژه

ظاهری به دست می‌آید. مقاومت ویژه ظاهری از حاصل ضرب مقاومت الکتریکی در فاکتور هندسی آرایه الکتروودی محاسبه می‌شود. قراردادهای متفاوتی برای چینش مقاومت ویژه ظاهری وجود دارد. مقاومت ویژه ظاهری برای مرکز چهار الکتروود در نظر گرفته می‌شود و موقعیت آن در جهت قائم، با نسبتی از فاصله الکتروودی تعیین می‌گردد (Loke, 2001). انتخاب موقعیت در جهت Z مرتبط با عمق بررسی می‌باشد. طبق تعریف، عمق بررسی، عمقی است که اگر لایه نازکی در آن عمق قرار گیرد، بیشترین اثر بر روی سیگنال الکتریکی ثبت شده در سطح زمین نشان دهد (Evjen, 1938). Roy (1971) و Roy and Apparao (1971) و Roy (1972)، Apparao and Roy (1971) عمق بررسی را برای زمین همگن و ایزوتروپ محاسبه کردند. Edwards (1977) عمق بررسی موثر (عمق متوسط) را به صورت عمقی که اثر سیگنال الکتریکی بالا و پائین آن عمق برابر است، تعریف کرد. به عبارت دیگر عمقی که ۵۰ درصد از جریان الکتریکی از زیر آن عمق عبور کند. جهت محاسبه عمق بررسی Roy and Apparao (1971)، رابطه ۱ را ارائه داده‌اند.

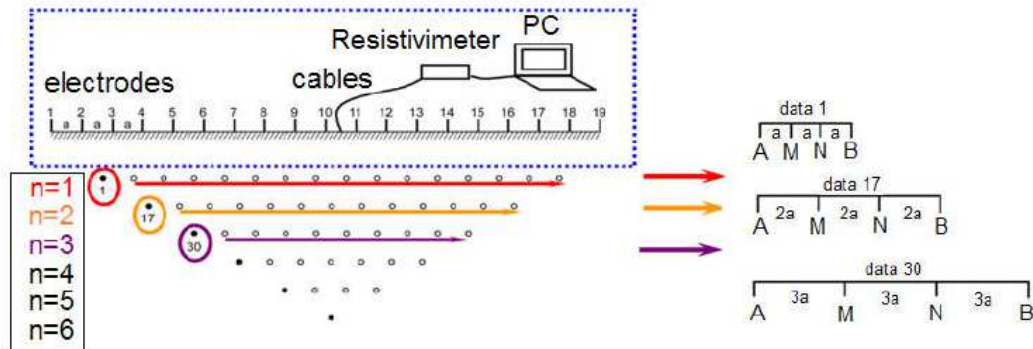
$$A=0.195 \times L \quad (1)$$

که در آن A عمق بررسی و L طول کل آرایه است.

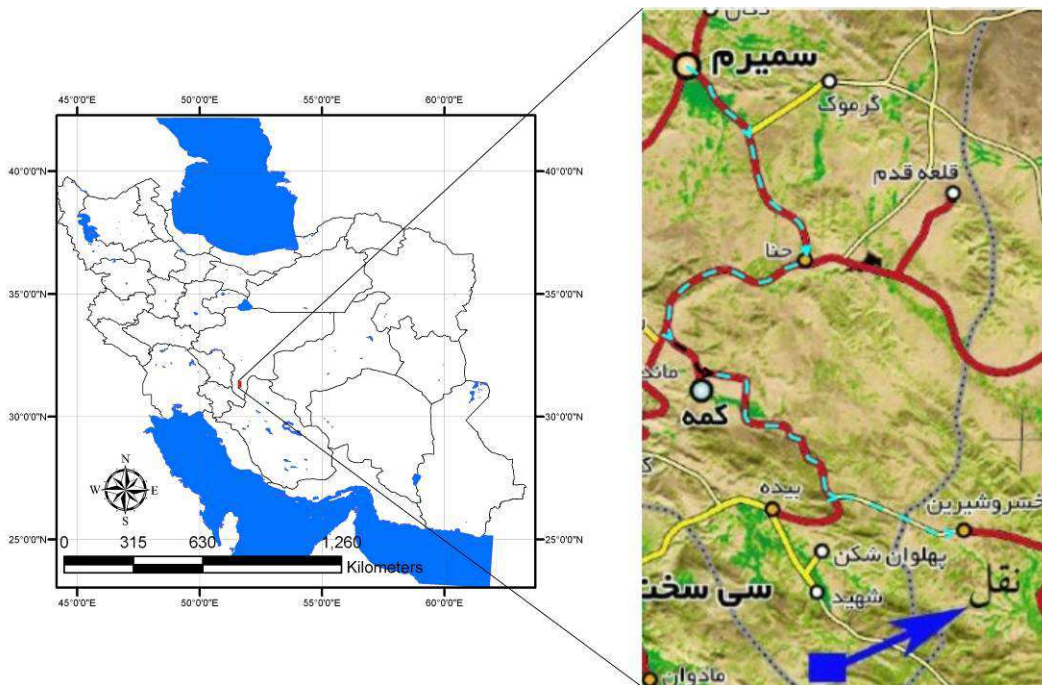
مرحله نهایی در تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی، وارون‌سازی می‌باشد. به منظور تهیه تصویری از توزیع مقاومت ویژه واقعی زیرسطحی باید به وارون‌سازی داده‌ها پرداخت. در فرآیند وارون‌سازی، به دنبال مدل ریاضی هستیم به طوری که مقاومت ویژه‌های ظاهری محاسبه شده از مدل و اندازه‌گیری شده کمترین اختلاف را داشته باشند. هسته اصلی برنامه وارون‌سازی، مدل مستقیم می‌باشد. مدل‌سازی مستقیم ارتباط ریاضی بین پارامترها و پاسخ مدل (مقاومت ویژه ظاهری) می‌باشد. برای حل مدل مستقیم از روش‌های عددی تفاضل محدود (Dey and Morrison, 1979) و یا اجزای محدود (Sasaki, 1992) استفاده می‌شود. مدل مستقیم در یک فرآیند تکراری قرار می‌گیرد که طی آن ریشه مربعات اختلاف داده‌ها و مدل حداقل می‌گردد (کمترین مربعات خطا). در این فرآیند تکراری، مدل اولیه معمولاً نیم فضای هموزن می‌باشد. مدل نهایی معمولاً در کمتر از ۵ تکرار به دست

(1995) کاربرد زیادی یافته است. این نرم‌افزار از هر دو روش اختلاف محدود و اجزا محدود برای حل مدل مستقیم استفاده می‌نماید.

می‌آید. در نهایت مقطع مقاومت ویژه واقعی، وضعیت ناهمگنی مقاومت ویژه زیرسطحی را نشان می‌دهد. از میان نرم‌افزارهای وارون‌سازی، Res2Dinv (Loke and Barker, )



شکل ۱. مثالی از نحوه برداشت مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه ونر



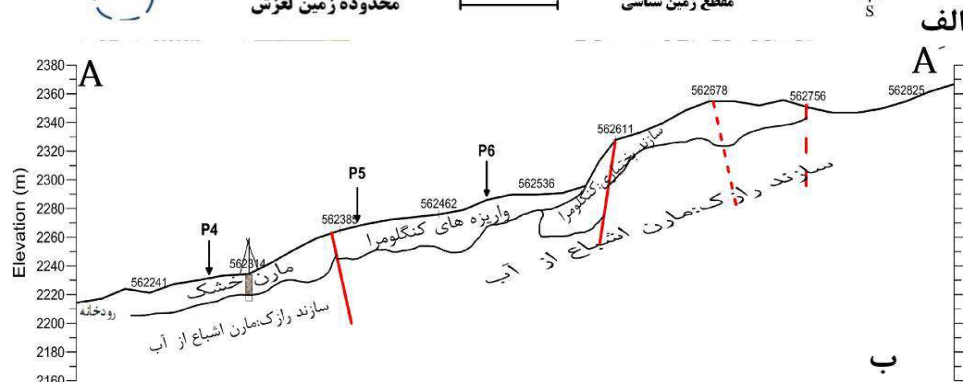
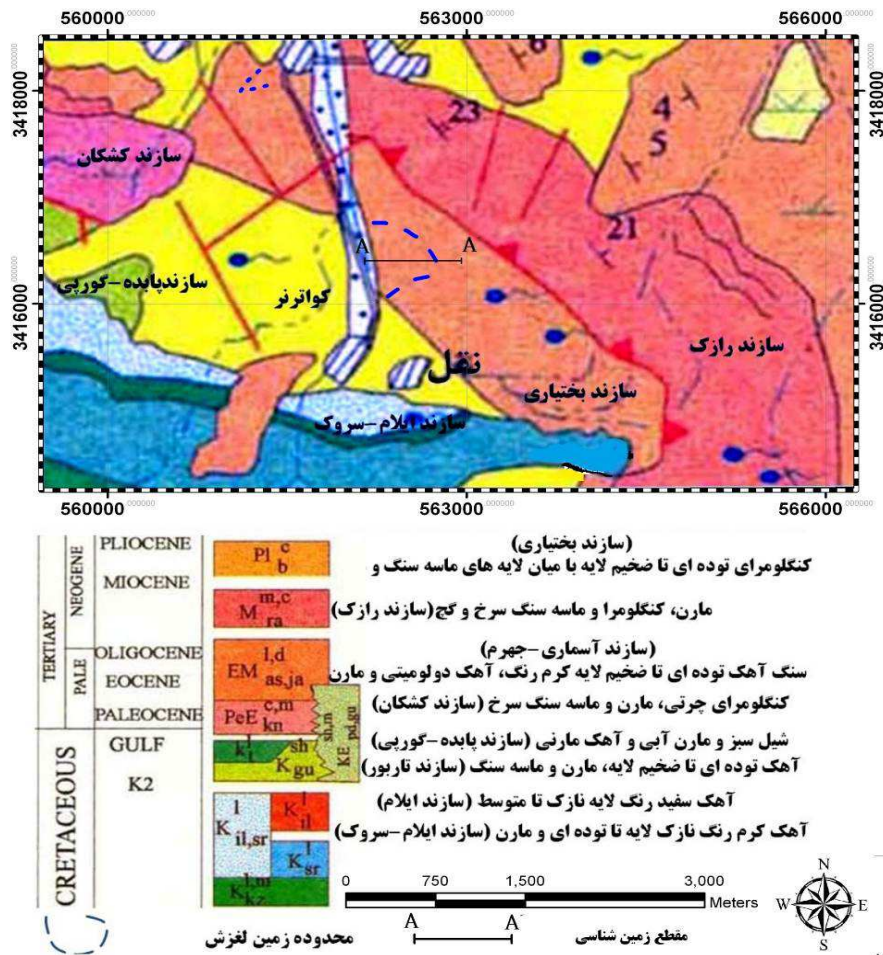
شکل ۲. موقعیت زمین‌لغزش نقل و راه دسترسی محدوده مورد مطالعه

زمین‌ساختی زاگرس بلند (مرتفع) که یکی از مناطق فعال زمین‌شناسی ایران محسوب می‌شود، قرار دارد. سازندهای موجود در منطقه عمدتاً از رخساره‌های رسوبی سنزوییک هستند که گسترش نسبتاً وسیعی در زون ساختمانی زاگرس مرتفع دارند و در محدوده مورد مطالعه عمدتاً سازندهای رازک، بختیاری و نهشته‌های کواترنری برونزد دارند. توده اصلی زمین‌لغزش در سازند بختیاری و یا هم ارز بختیاری

۳. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده زمین‌لغزش نقل زمین‌لغزش نقل در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب شهرستان حنا در منطقه سمیرم استان اصفهان در طول جغرافیایی  $39^{\circ} 10'$  و عرض جغرافیایی  $51^{\circ} 39' 52''$  قرار دارد. دسترسی به منطقه مورد نظر از طریق جاده آسفالتی سمیرم-حنا-کیفته-نقل امکان‌پذیر است (شکل ۲).

زمین لغزش نقل نشان داده شده است، این مقطع با توجه به خط برداشت مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی P2 و بررسی‌های صحرایی و زمین‌شناسی تهیه شده است.

رخداده است. در این محدوده سازند بختیاری از کنگلومرا با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و مارن تشکیل شده است (شکل ۳-الف). در شکل ۳-ب مقطع زمین‌شناسی عمود بر



شکل ۳. الف. بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوج. سازندهای رازک و بختیاری و تماس گسله آنها در نزدیکی محدوده لغزشی در شکل نشان داده شده است. محدوده زمین‌لغزش‌های نقل و کهنگان نیز نشان داده شده است. ب. مقطع زمین‌شناسی عمود بر زمین‌لغزش نقل، به دست آمده از اطلاعات زمین‌شناسی و نیمرخ ژئوفیزیکی خط برداشت P2.

۲- بخش میانی که از مرکز زمین لغزش شروع می‌شود و تا ضلع شمالی آن ادامه دارد (شکل ۵). ترکیب مصالح در این بخش از جنس لایه‌های مارنی و آهک‌های مارنی است. بنابراین قرارگیری لایه‌های مارنی و آهک‌های مارنی در زیرلایه‌های خاک باعث لغزش دامنه شده است (مهندسین مشاور افراز نقشه آریا، ۱۳۹۱).

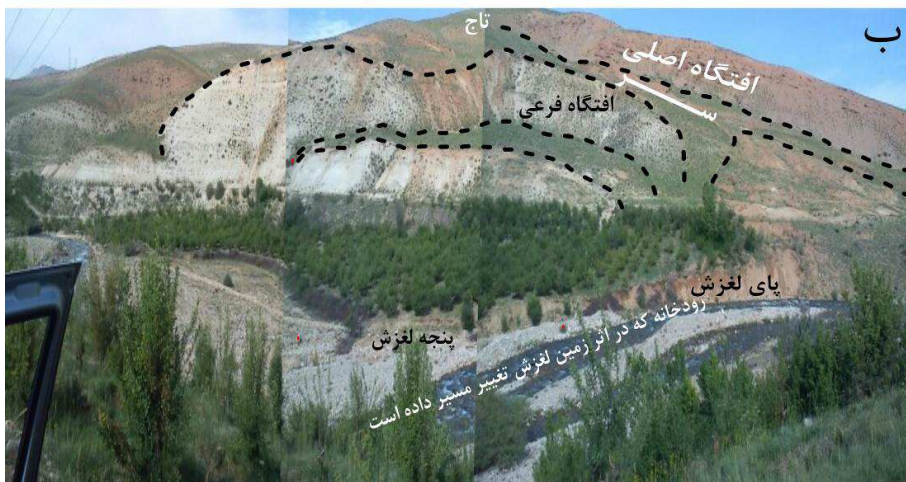
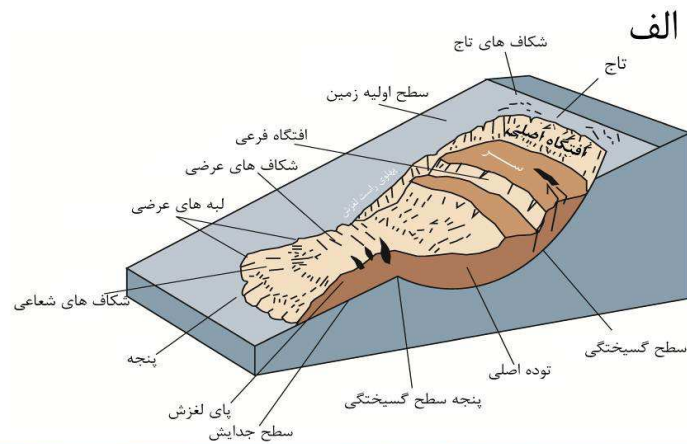
با توجه به بررسی‌های انجام شده تنها شواهد موجود از سفره آب زیرزمینی، چشمه‌های فصلی در سطح توده لغزشی هستند. چشمه‌های مذکور در نتیجه برخورد به لایه‌های نفوذناپذیر به سطح زمین رسیده‌اند. وجود چشمه‌ها می‌تواند تأثیرات مثبت و منفی در پایداری داشته باشد. از طرفی چشمه‌های موجود در سطح توده لغزشی می‌تواند امکان زهکشی مصالح را فراهم کند و بدین ترتیب از فشار آب منفذی داخل رسوبات کاسته می‌شود و پایداری افزایش می‌یابد. در مواردی که مسیر حرکت آب چشمه‌ها در اعماق قرار دارد و به دلیل طولانی بودن مسیر جریان، امکان تخلیه سریع چشمه‌ها وجود ندارد، احتمال ناپایداری افزایش می‌یابد. بنابراین ایجاد شبکه‌های زهکش زیرسطحی برای تخلیه سریع آب‌های زیرزمینی می‌تواند یکی از راه‌حل‌های پایدارسازی توده باشد (مهندسین مشاور افراز نقشه آریا، ۱۳۹۱).

بررسی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث و مشاهدات صحرایی نشان‌دهنده آن است که شکل توده لغزش مخروط ناقص با زاویه رأس به سمت شرق می‌باشد. قاعده مخروط به سمت رودخانه دنگزلو (سرشاخه رودخانه ماربر) بوده و جهت حرکت کلی توده نیز از سمت شرق به غرب (به سمت رودخانه) است. در شکل ۴ تصویری طرح وار از یک اسلامپ (براساس تقسیم‌بندی وارنز، یک نوع لغزش دورانی که معمول‌ترین نوع زمین‌لغزش است) با مشخصات فیزیکی آن و زمین‌لغزش نقل نشان داده شده است (حقیقی و همکاران، ۱۳۸۹). ابعاد توده لغزیده حدود ۷۰۰ در ۶۰۰ متر می‌باشد (شکل ۵).

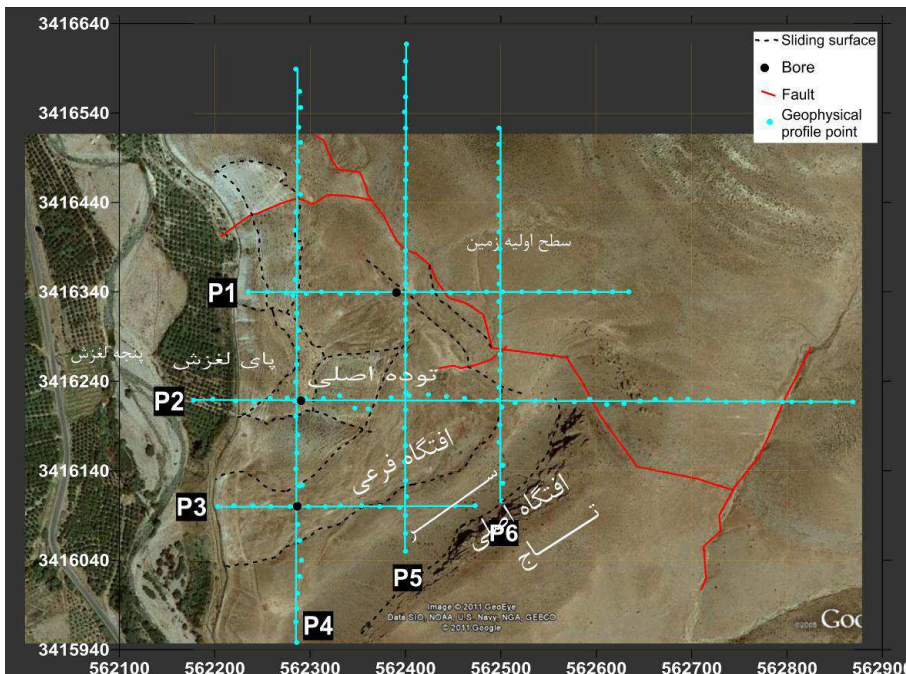
بر اساس مطالعات صورت گرفته در منطقه پادناهی سمیرم، عوامل ایجاد کننده زمین‌لغزش به طور خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد: وجود سازندها و یا میان‌لایه‌های شیلی- مارنی ضعیف از نظر مکانیکی و کم‌تراوا، وجود گسل‌های فراوان، تاقدیس‌های متعدد و قرارگیری در زون زاگرس مرتفع که سبب گردیده از نظر تکنیکی فعال و پرتکاپو باشد، بارش فراوان (برف و باران) و در نتیجه افزایش فشار آب منفذی و نهایتاً وجود چشمه‌های فراوان در منطقه، وجود رودخانه دائمی و حرکت مئاندری آن که در تخریب دامنه‌های مجاور خود مؤثر است و شیب تند توپوگرافی (عنایتی‌مقدم، ۱۳۸۶). مطالعات و بررسی‌های زمین‌شناسی صورت گرفته در منطقه نشان می‌دهد که در محدوده زمین‌لغزش نقل، عملکرد گسل‌های موجود در بالادست و شمال سطح لغزش نیز نقش مهمی در ایجاد توده لغزشی دارد.

بررسی‌های صحرایی و نتایج حاصل از حفاری‌ها نشان می‌دهد که سطح لغزش مخلوطی از مصالح کنگلومرا با مارن و آهک‌های مارنی می‌باشند. اختلاط لایه‌های مذکور که متعلق به سازندهای بختیاری و رازک می‌باشد در نتیجه عملکرد گسل F1 و گسل وزنی مسبب لغزش بوده است. وجود لایه‌های ضعیف و سست مارنی که در اثر نفوذ آب‌های سطحی حالت لغزنده پیدا می‌کنند، عامل زمین‌لغزش و حرکت دامنه‌ای آن می‌باشد (مهندسین مشاور افراز نقشه آریا، ۱۳۹۱). بر اساس جنس و ترکیب لیتولوژی لایه‌ها می‌توان سطح توده لغزشی را به دو قسمت متفاوت تقسیم کرد:

۱- بخش پیرامونی و محیطی زمین‌لغزش که شامل واریزه‌های درشت‌دانه همراه با درصد کمی از سیلت و رس با دانه‌بندی GC-GM است. این بخش از ضلع جنوبی زمین‌لغزش شروع شده و به صورت یک نوار حاشیه‌ای تا ضلع شمالی امتداد می‌یابد. شکل ۴ و ۵ بخش‌های مختلف توده لغزشی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الف. معمول ترین نوع زمین لغزش (اسلامپ) ب. زمین لغزش نقل (نگاه به سمت شرق)



شکل ۵. موقعیت شش پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی بر روی تصویر Google earth محدوده زمین لغزش نقل. گسل ها، و اثر لغزش ها بر روی شکل مشخص شده اند. محل چاه ها با نقطه سیاه مشخص شده است.

#### ۴. مطالعات ژئوالکتریک و حفر چاهک‌های اکتشافی

بر اساس شواهد موجود، به احتمال زیاد یک سطح گسیختگی می‌تواند در مرز جدایش زون هوازده (دارای ساختار به هم ریخته) و زون غیرهوازده و سالم در میان‌لایه‌های مارنی سازند بختیاری اتفاق افتاده باشد. لذا وجود تباین مقاومت ویژه الکتریکی بین بخش هوازده و بخش غیرهوازده (سطح گسیختگی احتمالی) به خوبی با روش ژئوالکتریک قابل شناسایی است.

در مطالعه ژئوالکتریک زمین‌لغزش نقل از روش مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی با آرایه دو قطبی-دوقطبی در طول ۶ پروفیل (شکل ۵) با آزیموت‌های صفر و ۹۰ درجه اندازه‌گیری استفاده شد (مجموع طول پروفیل‌ها ۳ کیلومتر می‌باشد). طول پروفیل‌ها بیشتر از عرض زمین‌لغزش انتخاب شد، تا وضعیت زیرسطحی در هر دو مصالح گسیخته و بکر بررسی شوند. با توجه به عدم آگاهی از عمق قرارگیری سطوح لغزش در این منطقه، کوچک‌ترین فاصله الکترودی ۲۰ متر برای برداشت‌ها انتخاب شد که با توجه به رابطه (۱) عمق بررسی در بازه تقریبی ۱۲ تا ۶۰ متر قرار می‌گیرد. لذا تفسیرهای مربوط به اعماق کمتر از ۱۲ متر از عدم قطعیت بیشتری برخوردار است. خطوط برداشت با نام‌های P1 تا P6 نام‌گذاری شده‌اند. خطوط برداشت P1، P2 و P3 امتداد شرقی-غربی و خطوط برداشت P4، P5 و P6 امتداد شمالی-جنوبی دارند (شکل ۵). جدول ۱ مشخصات پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

تجهیزات مورد استفاده شامل یک دستگاه ژئوالکتریک WDDS-2 با قدرت ۳۵۰۰ وات و کابل هوشمند جهت برداشت نیمه اتوماتیک مقاومت ویژه الکتریکی و مجموعه‌ای از الکترودهای فلزی می‌باشد.

برای تفسیر کمی داده‌ها، از روش کمترین مربعات خطا در نرم‌افزار Res2Dinv بهره گرفته شد. بدین ترتیب برای هر پروفیل دو مقطع مقاومت ویژه ظاهری و یک مدل بلوکی

مقاومت ویژه الکتریکی، به دست آمده از مدل‌سازی معکوس، ترسیم گردید. به عنوان مثال برای خط برداشت P1 نمودارهای مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده و محاسباتی (ظاهری) به همراه مدل بلوکی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در بیشتر خطوط برداشت مقادیر خطای مدل‌سازی معکوس نسبتاً بالا بوده، مقادیر مربوط به bad points در هر خط برداشت حذف شده و عمل مدل‌سازی معکوس دوباره انجام گردید و مقدار خطای مدل‌سازی به مقدار قابل قبولی کاهش یافت. پس از اعمال اثر توپوگرافی، مدل‌های بلوکی خروجی ترسیم شدند. همچنین در محدوده زمین‌لغزش نقل ۳ حلقه چاهک دستی اکتشافی حفر شده است. چاهک شماره ۱ بر روی خط برداشت P1 و چاهک‌های ۲ و ۳ بر روی خطوط برداشت P2 و P3 حفاری شده‌اند. محل این چاهک‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. مختصات و عمقی که این چاهک‌ها به سطح لغزش برخورد کرده اند در جدول ۲ آورده شده است. مشخصات هر چاهک، عمق، واحدهای قرار گرفته در آنها و سطح لغزش تشخیص داده شده با آنها، به صورت بزرگ‌نمایی شده، در هر نیمرخ مقاومت ویژه در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. از نتایج حاصل از این چاهک‌ها در تأیید و بسط تفسیرهای ژئوفیزیکی استفاده شده است.

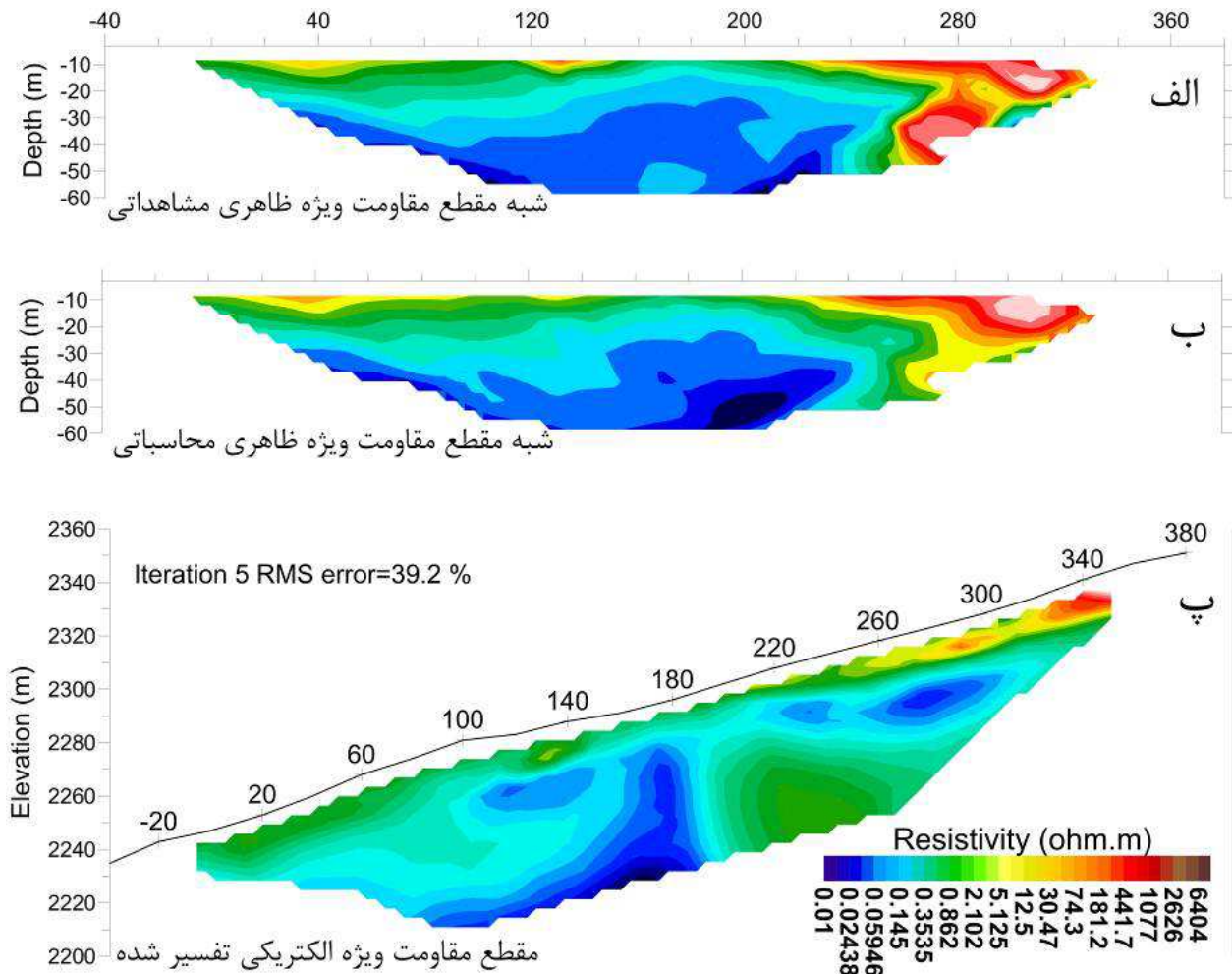
جدول ۱. مشخصات پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت

شماره	نام خط برداشت	طول خط برداشت (متر)	امتداد خط برداشت	تعداد ایستگاه‌ها
۱	P1	۴۰۰	E-W	۲۱
۲	P2	۷۰۰	E-W	۳۶
۳	P3	۲۶۰	E-W	۱۴
۴	P4	۶۴۰	N-S	۳۳
۵	P5	۵۶۰	N-S	۲۹
۶	P6	۴۲۰	N-S	۲۲



جدول ۲. مقایسه عمق لغزش بدست آمده از برداشت مقاومت ویژه الکتریکی و حفاری های کم عمق

حفاری	خط برداشت	مختصات			عمق سطح لغزش (متر)
		X (UTM)	Y (UTM)	Z	
۱	P1	۵۶۲۳۹۰	۳۴۱۶۳۴۰	۲۲۸۴	۱۰
۲	P2	۵۶۲۳۱۴	۳۴۱۶۲۱۹	۲۲۳۴	۲۰
۳	P3	۵۶۲۳۱۰	۳۴۱۶۱۰۰	۲۲۴۵	۵



شکل ۶. الف. شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهداتی ب. شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسباتی پ. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده.

زمین رخنمون دارد. در این بخش واریزه در سطح زمین وجود ندارد، لذا تغییرات مقاومت ویژه از سطح به عمق (از ۱۵ اهم متر به ۱ اهم متر) مربوط به تغییرات فیزیکی و ساختاری در داخل مارن می باشد. با توجه به مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی، مقادیر ۱۵ اهم متر مارن هوازده و ۱ اهم متر مارن مرطوب

۱-۴. تفسیر مقاطع ژئوالکتریک  
شکل های ۷ تا ۱۲ مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده را نشان می دهند. پروفیل P1 (شکل ۷) در جهت زمین لغزش (شرقی-غربی) در شمال محدوده لغزش برداشت شده است. بخش غربی مقطع شامل سازند مارن می باشد که در سطح

لغزش دیگری در اعماق حدود ۵۰ متری در غرب پروفیل پیش‌بینی می‌شود.

پروفیل P3 (شکل ۹) به طول ۲۶۰ متر در جهت حرکت زمین‌لغزش در بخش جنوبی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. واریزه‌ها و کنگلومرای نابرجا در سطح (مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر) و مارن در عمق (مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۱ اهم‌متر) مشاهده می‌شود. پرتگاه جنوبی محدوده لغزش که احتمالاً گسله می‌باشد، در روی شکل نشان داده شده است. سطح لغزش کم‌عمق در عمق ۴ متری در چاهک حفر شده مشاهده شد.

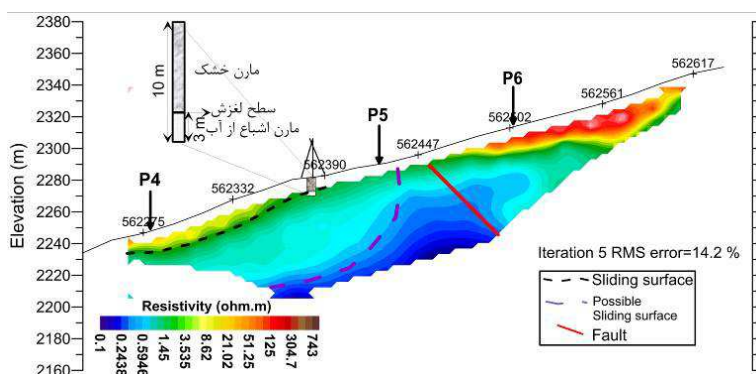
پروفیل P4 (شکل ۱۰) عمود بر جهت حرکت زمین‌لغزش می‌باشد. در عمق، وجود آنومالی رسانا مرتبط با مارن دیده می‌شود. در شمال پروفیل، آنومالی مقاوم (احتمالاً کنگلومرا) در کنار مارن توسط گسل جدا شده است. این گسل در شرق پروفیل P1 (شکل ۷) دیده می‌شود. همچنین در شمال شرق محدوده مورد مطالعه گسل مزبور قابل مشاهده است (شکل ۵). پرتگاه لغزش جنوبی محدوده در جنوب این پروفیل مشاهده می‌شود. عمق متوسط سطح لغزش حدود ۲۰ متر می‌باشد.

پروفیل P5 (شکل ۱۱) دارای جهت شمالی-جنوبی است. در شمال پروفیل (خارج از محدوده زمین‌لغزش) مارن‌ها تا نزدیکی سطح ادامه یافته‌اند. وجود آنومالی مقاوم در شمالی‌ترین بخش پروفیل، توسط گسل شمال‌شرقی در کنار مارن رسانا قرار گرفته است (شکل ۵). سطح لغزش در جنوب پروفیل مشاهده می‌شود.

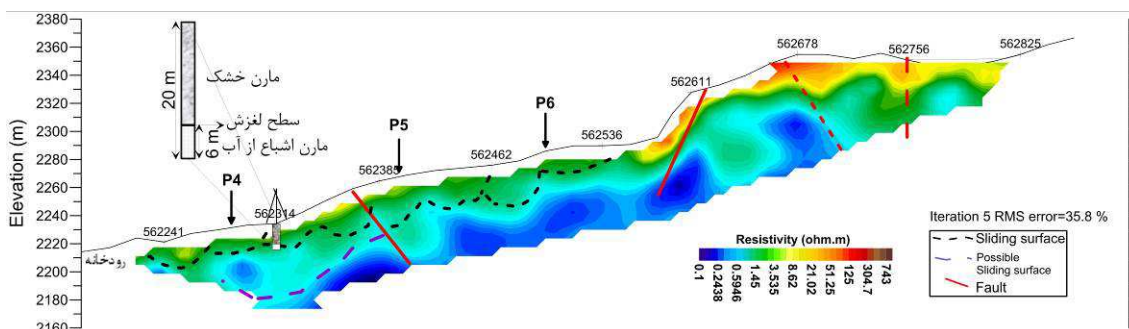
پروفیل P6 (شکل ۱۲) عمود بر جهت زمین‌لغزش اجرا شد. همانند پروفیل‌های P5 و P6، مارن در جنوب پروفیل و کنگلومرا در شمال آن دیده می‌شود. سطح لغزش کم‌عمق (مرتبط با حرکت کنگلومراها و واریزه‌ها در بخش بالایی مارن‌ها)، بر روی مارن‌ها در جنوب پروفیل دیده می‌شود. این پروفیل در بالاترین قسمت زمین‌لغزش (نزدیک تاج آن) برداشت شده است. لذا سطح لغزش در این مقطع در عمق بسیار کم در بخش فوقانی مارن قابل مشاهده است.

می‌باشد. در بخش شرقی مقطع نزدیک سطح زمین، مقاومت ویژه بزرگ‌تر از بخش غربی است که مرتبط با واریزه‌ها می‌باشد. در عمق وجود یک آنومالی مقاوم (بیش از ۱۵ اهم‌متر) مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن شواهد سطحی و تصویر ماهواره‌ای (شکل ۵) وجود گسل در این بخش محتمل به نظر می‌رسد. لغزش صورت گرفته در مارن‌ها در بخش غربی مقطع احتمالاً مرتبط با ضعف مکانیکی ایجاد شده در آن‌ها به دلیل وجود گسل و همچنین نفوذ آب به داخل زمین می‌باشد. عمق سطح لغزش در عمق حدود ۱۰ متری مشاهده می‌شود. حفاری چاهک دستی صورت گرفته بر روی این پروفیل (شکل ۷) وجود سطح لغزش در عمق ۷ متری را نشان می‌دهد. در این عمق آب از طریق منافذ ایجاد شده در سطح گسیختگی به داخل چاه وارد می‌شود. وجود خراش و شیار حاصل از حرکت توده بر روی مصالح لغزش، به خوبی قابل مشاهده است. مقطعی از گمانه حفر شده در این خط برداشت در شکل ۷ به صورت بزرگ‌نمایی شده نشان داده شده است. وجود لغزش عمیق با حفر گمانه قابل بررسی است.

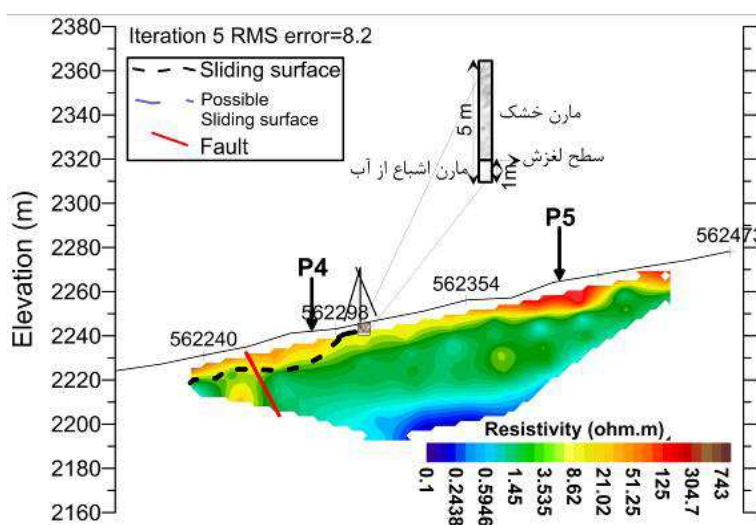
پروفیل P2 (شکل ۸) با جهت شرقی-غربی در مرکز محدوده مورد مطالعه اجرا شده است. این پروفیل با طول حدود ۷۰۰ متر از نزدیکی رودخانه شروع و تا ۳۰۰ متر خارج از محدوده زمین‌لغزش ادامه می‌یابد. بخش غربی مقطع شامل مارن با مقاومت ویژه الکتریکی قابل مقایسه با مارن در پروفیل P1 می‌باشد. در عمق، یک آنومالی مقاوم (در شرق مارن‌ها) قابل مشاهده است. تماس این دو آنومالی مقاوم و رسانا احتمالاً گسله می‌باشد. آنومالی با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۲۰ اهم‌متر مشاهده شده در سطح (رنگ سبز) مربوط به واریزه‌ها و در بعضی قسمت‌ها متأثر از کنگلومرای لغزیده بر روی لایه مارنی می‌باشد. عمق سطح لغزش کم‌عمق در این مقطع، حدود ۲۰ متر پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این که این پروفیل در مرکز زمین‌لغزش قرار دارد، انتظار می‌رود عمق سطح لغزش بیشتر از دو پروفیل جانبی باشد. چاهک حفر شده، سطح لغزش کم عمق را در عمق ۱۴ متری نشان می‌دهد. سطح



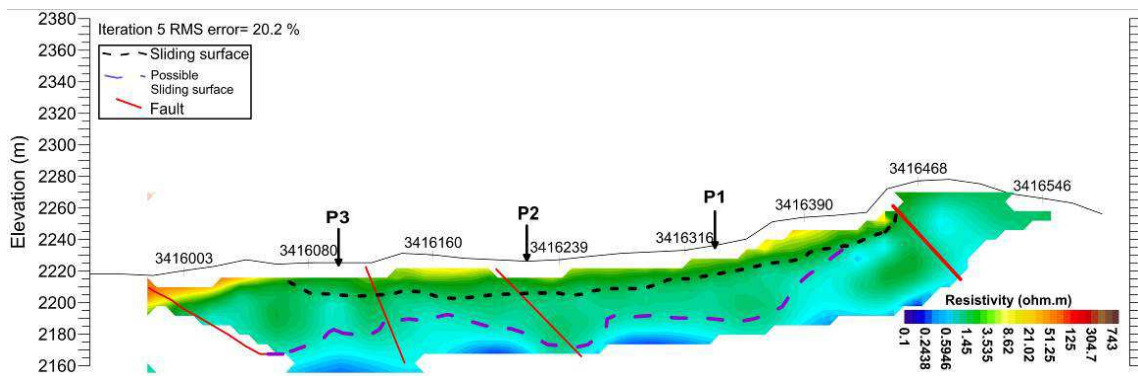
شکل ۷. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P1. در روی شکل سطح لغزش‌های کم عمق و عمیق احتمالی و گسل بین مارن و واحد مقاوم نشان داده شده‌اند. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P4، P5 و P6 تلاقی دارد. عمق سطح لغزش کم عمق در حفاری چاه دستی ۷ متر مشاهده می‌شود.



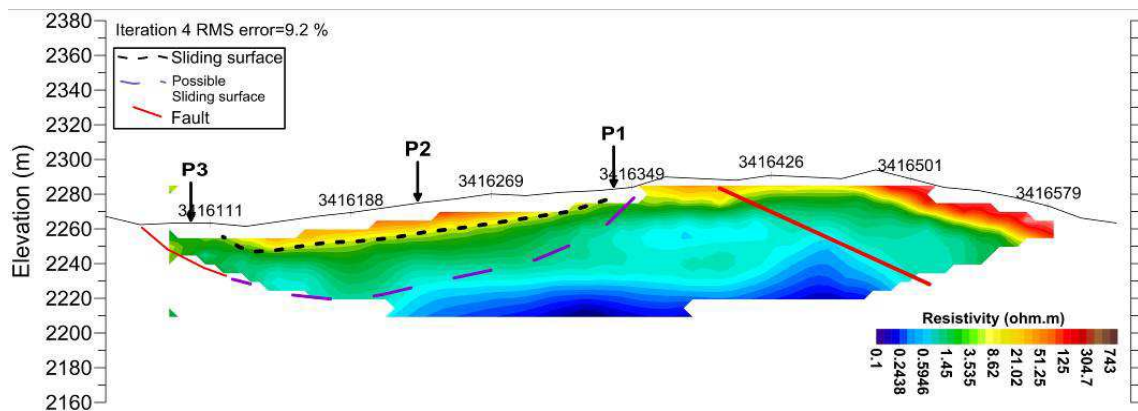
شکل ۸. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P2. در روی شکل سطح لغزش‌های کم عمق و عمیق احتمالی و گسل‌ها بین مارن و واحد مقاوم نشان داده شده‌اند. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P4، P5 و P6 تلاقی دارد. عمق سطح لغزش کم عمق در حفاری چاه دستی ۱۴ متر مشاهده می‌شود.



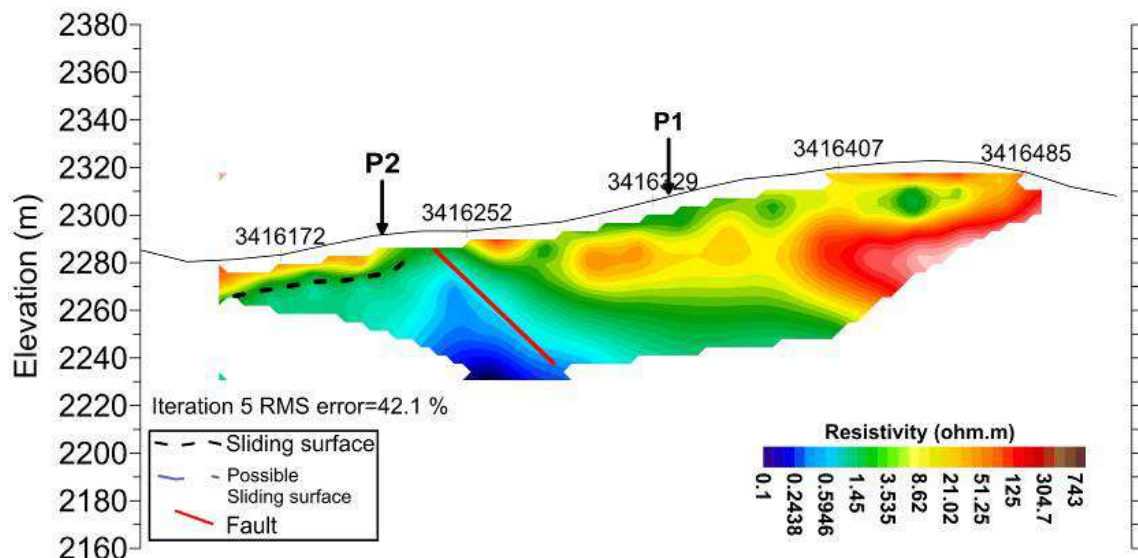
شکل ۹. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P3. در روی شکل، سطح لغزش و گسل احتمالی بین مارن و واحد مقاوم نشان داده شده‌اند. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P4 و P5 تلاقی دارد. عمق سطح لغزش کم عمق در حفاری چاه دستی ۴ متر مشاهده می‌شود.



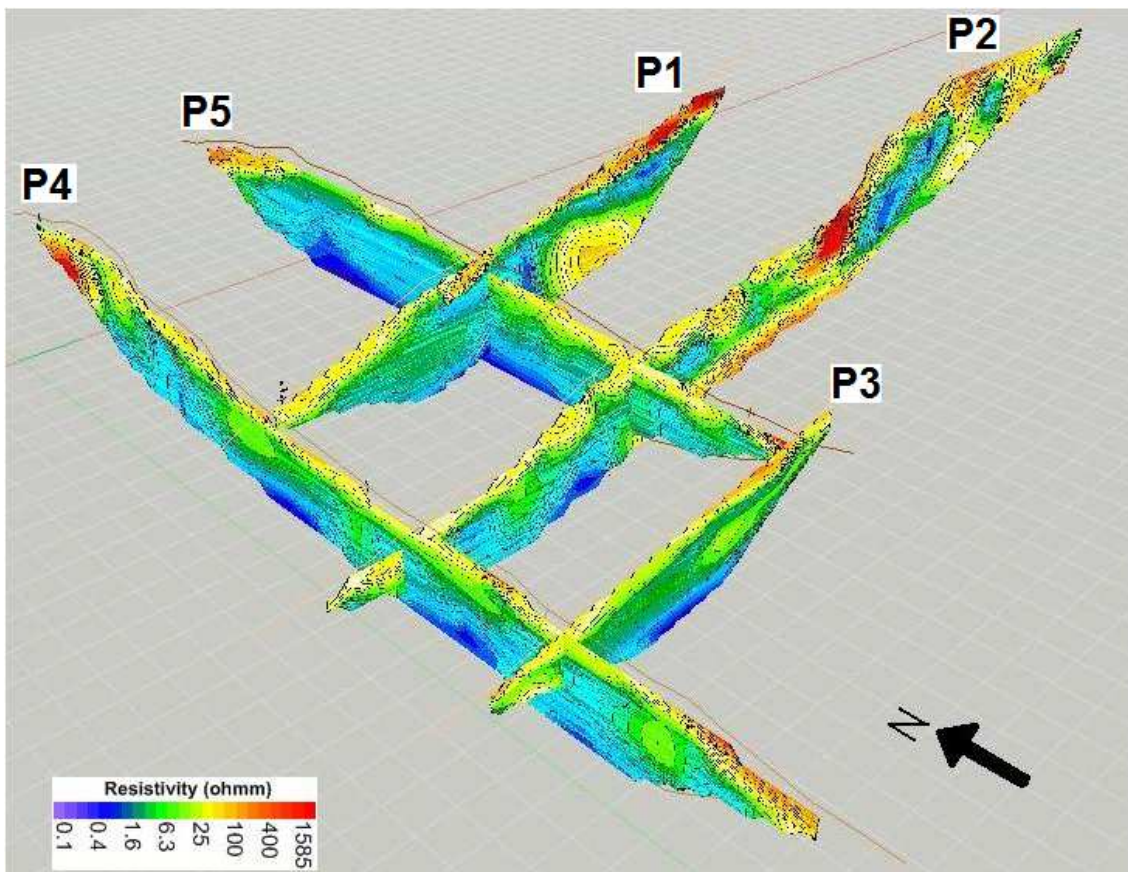
شکل ۱۰. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P4. در روی شکل، سطح لغزش‌های کم‌عمق و عمیق احتمالی و گسل احتمالی بین مارن و واحد مقاوم نشان داده شده‌اند. تغییرات ساختاری در داخل مارن نیز با خطوط قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P1، P2 و P3 تلاقی دارد.



شکل ۱۱. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P5. در روی شکل، سطح لغزش‌های کم‌عمق و عمیق احتمالی با خط چین نشان داده شده است. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P1، P2 و P3 تلاقی دارد.



شکل ۱۲. مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P6. در روی شکل، گسل احتمالی بین مارن و واحد مقاوم با خط قرمز رنگ نشان داده شده است. این پروفیل در محل‌های نشان داده شده با پروفیل‌های P1 و P2 تلاقی دارد.



شکل ۱۳. شکل سه بعدی مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی واقعی محدوده زمین لغزش نقل. مقاومت ویژه کمتر از ۵ اهم متر (رنگ آبی) مربوط به مارن اشباع از آب، مارن هوازده دارای مقاومت ویژه الکتریکی ۱۵ اهم متر و بیش تر (رنگ زرد)، واریزه‌ها با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم متر و ماسه سنگ و کنگلومرا با مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۱۰۰ اهم متر (رنگ قرمز) نشان داده شده است.

دارای مقاومت ویژه الکتریکی ۱۵ اهم متر اندازه‌گیری شد. مقاومت ویژه رسوبات واریزه‌ای و نیز سازند کنگلومرایی به مراتب بیشتر از مقاومت ویژه مارن و بیش از ۱۰۰ اهم متر می‌باشد. بنابراین در نیمرخ‌های مقاومت ویژه الکتریکی واریزه‌ها و سازندهای کنگلومرایی با مقادیر مقاومت ویژه بالا و سازندهای مارنی با مقاومت ویژه پایین قابل بررسی و تعقیب هستند (جدول ۳). پدیده‌های ساختاری و لغزش باعث ایجاد ناهمگنی‌هایی در نیمرخ‌ها شده است. واحد کنگلومرایی در شرق گسل (قرار گرفته در شمال شرق محدوده) و مارن در غرب آن قرار دارد (شکل ۱۳).

جدول ۳. مقاومت ویژه الکتریکی سازندهای زمین‌شناسی در

محدوده زمین لغزش نقل	
سازند	مقاومت ویژه الکتریکی (اهم متر)
مارن	۱
مارن هوازده	< ۱۵
واریزه	۲۰-۱۰۰
کنگلومرا	> ۱۰۰

##### ۵. نتیجه‌گیری

بررسی نیمرخ‌های ژئوالکتریکی نشان می‌دهد که مقاومت ویژه الکتریکی مارن‌ها از ۱ تا ۱۵ اهم متر به ترتیب از مارن اشباع از آب تا مارن هوازده تغییر می‌کند. در رخنمون‌ها، مارن هوازده

مطالعات ژئوالکتریک نشان می‌دهد که مقاومت ویژه الکتریکی این دو مصالح زمین‌شناسی متفاوت می‌باشند (نیم‌رخ‌های ژئوالکتریک در نزدیک سطح زمین). به عنوان مثال بخش غربی نیم‌رخ P1 در نزدیکی سطح زمین مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۱۵ اهم‌متر که مربوط به مارن است و نیز نیم‌رخ P6 که مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۱۰۰ اهم‌متر را نشان می‌دهد مربوط به کنگلومرا می‌باشد. در نتیجه سطح لغزش کم‌عمق، فصل مشترک مقاومت ویژه الکتریکی ذکر شده با در نظر گرفتن هندسه و ساختار عمومی زمین‌لغزش در روی نیم‌رخ اعمال شد. این سطح لغزش با نتایج حفاری‌ها نیز مطابقت دارد.

مطالعه نیم‌رخ‌های مقاومت ویژه الکتریکی سطح لغزش احتمالی دیگری را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این سطح لغزش احتمالی بین مارن‌های اشباع از آب و مارن خشک افتاده است (مقاومت ویژه الکتریکی مارن اشباع کمتر از ۱ اهم‌متر و مارن با اشباع موضعی کمتر از ۱۵ اهم‌متر می‌باشد). این سطح لغزش باید با حفر گمانه‌ها با عمق بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. انتخاب گسل‌ها در روی نیم‌رخ‌ها با در نظر گرفتن اختلاف مقاومت ویژه در دو سوی گسل و انتقال اطلاعات از سطح زمین صورت گرفته است.

## ۶. تشکر و قدردانی

در این جا لازم است از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی و نیز شرکت مهندسی مشاور افراز نقشه آریا که امکان انجام این پژوهش را فراهم ساختند تشکر و قدردانی گردد.

وجود مارن در نزدیکی سطح زمین (در غرب گسل و در محدوده زمین‌لغزش) باعث ایجاد دو مکانیزم لغزش شده است که نتیجه آن لغزش بر روی دو سطح لغزش کم‌عمق و عمیق می‌باشد. برخی از عوامل مؤثر در ایجاد سطح لغزش کم‌عمق (عمق حدود ۲۰ متر) عبارتند از وجود رسوبات مارنی تا نزدیک سطح زمین، وجود واریزه بر روی آن، شیب توپوگرافی تند و نفوذ آب‌های سطحی برای مثال بارش در گستره محدوده مورد مطالعه و یا نفوذ رواناب‌های سطحی که در اثر چشمه‌های تماسی در گستره مورد مطالعه جاری می‌شوند. سطح لغزش عمیق در عمق حدود ۵۰ متر اتفاق افتاده است. عامل اصلی در ایجاد این سطح لغزش وجود گسل‌های نسبتاً عمیق (در مقیاس زمین‌لغزش) در محل تماس کنگلومرا و مارن می‌باشد. این گسل‌ها باعث ایجاد منطقه ضعیف مکانیکی شده است. محدوده گسل خورده، متخلخل و نفوذپذیر بوده و مسیری برای انتقال آب از طریق سازند کنگلومرا و تماس دائمی آب با مارن می‌باشد. وجود چشمه‌های تماسی در منطقه، وجود آبخوان احتمالی در سازند کنگلومرایبی را نشان می‌دهد. عمق سطح لغزش در حفاری‌های صورت گرفته بر روی پروفیل‌های ۱ تا ۳، انطباق خوبی با سطح لغزش پیش‌بینی شده از نتایج ژئوالکتریک دارد (جدول ۲). با توجه به این که شیب عمومی گسل‌ها در جهت لغزش و در جهت شیب توپوگرافی می‌باشد، لغزش تسریع می‌شود. فرسایش توده مارنی در تماس مستقیم آن با رودخانه در غرب محدوده زمین‌لغزش و حرکت مماندگی آن باعث تسریع در لغزش می‌گردد.

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی، لغزش به دلیل قرارگیری لایه مارنی در زیر سازند کنگلومرایبی رخ داده است. همچنین

## منابع

- حقیقی، م.ک.، عباسی، ب.، اشتری تلخستانی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی زمین لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تأمین ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی و سه بعدی، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۶، (۱).
- عنایتی مقدم، ع.، ۱۳۸۶، ارزیابی عوامل ایجاد زمین لغزش های جاده ای در منطقه پادناهی سمیرم و ارائه راهکارهای مناسب جهت تثبیت آنها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.
- فتاحی بندپی، م.، ارومیه ای، ع.، صفایی، م.، ۱۳۸۵، بررسی زمین لغزش های جاده ای در محور گلوگاه-فیروزجا و دو محور فرعی مجاور.
- قربانی، ا.، تدین، م.، ۱۳۸۹، اعتبارسنجی تفسیر سونداژ الکتریک توسط مدل سازی سه بعدی، چهاردهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ۲۵ الی ۲۸ شهریور ۱۳۸۹، ارومیه.
- مهندسین مشاور افراز نقشه آریا، ۱۳۹۱، گزارش زمین شناسی زمین لغزش نقل.
- Apparao, A., and Rao, T.G., 1974, Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes: *Geophys. Prospect.*, 22, 211-223.
- Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, P., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T., and Burns, R., 2004, Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks Landslide, *Landslide*, 1, 29-40.
- Demoulin, A., Pissart, A., and Schroeder, C., 2003, On the origin of late Quaternary paleo-landslides in the Liege (E Belgium) area: *Int. J. Earth Sci.*, 92, 795-805.
- Dey, A., and Morrison, H.F., 1979, Resistivity modeling for arbitrary shaped two dimensional structures: *Geophys. Prospect.*, 27, 1020-1036.
- Edwards, L.S., 1977, A modified pseudosection for resistivity and induced polarization: *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Evjen, H.M., 1938, Depth factors and resolving power of electrical measurements: *Geophysics*, 3, 78-95.
- Jongmans, D., and Garambois, S., 2007, Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 178, 101-112.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F., 2005, Case history: 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine (Southern Italy): *Geophysics*, 70, (3), B11-B18.
- Loke, M.H., 2001, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys: *Geotomo Software: Penang, Malaysia*. <http://www.geoelectrical.com>.
- Loke, M.H., and Barker, R.D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method: *Geophys. Prospect.*, 44, 131-152.
- Loke, M.H., and Barker, R., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections: *Geophysics*, 60, 1682-1690.
- Meric, O., Garambois, S., Jongmans, D., Wathelet, M., Goio, J.L., Strobba, A.C., and de Bacco, G., 2006, Geophysical characterization of a rockslide in an alpine region: *Eng. Geol.*, 83, 273-286.
- Perrone, A., Lannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F., 2004, High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earth flow (Southern Italy): *J.Appl.Geophys.*, 56(1), 17-29.
- Roy, A., 1972, Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods: *Geophys. Prospect.*, 20, 329-340.
- Roy, A., and Apparao, A., 1971, Depth of investigation in direct-current methods: *Geophysics*, 36, 943-959.
- Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation: *Geophys. Prospect.*, 40, 453-463.

Werkema, D., Atekwana, Jr. E., Sauck, W., and Asumadu, J.A., 2000, A Generic Automated/Semiautomated Digital Multi-Electrode Instrument for Field Resistivity Measurements: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 49(6), 1249-1253.